

네오디뮴 영구자석을 이용한 미세칩 제거장치의 개발

최성윤*, 왕준형**, 왕덕현***,#

*경남대학교 대학원 첨단공학과, **한국전기연구원 공정혁신시뮬레이션센터, ***경남대학교 기계공학부

Development of Microchip Removal Equipment Using Neodymium Permanent Magnets

Sung-Yun Choi*, Jun-hyeong Wang**, and Duck Hyun Wang***,#

*Department of Advanced Engineering, Graduate School, Kyungnam Univ.,

**Korea Electrotechnology Research Institute(KERI) Manufacturing Innovation Simulation Center.,

***School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

(Received 06 November 2020; received in revised form 01 February 2021; accepted 16 February 2021)

ABSTRACT

Machining operations require removal of chips to keep the coolant clean and fresh throughout the operation time. In this study, microchip removal equipment was developed using AutoCAD and CATIA programs for 3D modeling and 2D draft. In addition, the flow analysis and electromagnetic field analysis of the equipment were performed using the COMSOL Multiphysics program. The flow design of the coolant oil tank was realized on the basis of fluid analysis results. Further, on the basis of magnetic density analysis, a conveyor was designed for effectively removing metal microchips in the tank by using arrays of neodymium permanent magnets.

Key Words : Micro Chip(미세칩), Permanent Magnet(영구자석), Magnetic Flux Density(자속밀도), Flow Analysis (유동해석)

1. 서 론

공작기계를 사용하는 가공에서는 대부분 칩이 발생하고 가공목적을 충족하기 위하여 절삭유를 사용하고 있으며, 수용성절삭유는 물과 희석하여 사용함으로 부품가공 단계에서 다량의 폐절삭유가 발생한다.^[1] 절삭가공에서 발생하는 칩제거를 위하여 종래의 공작기계에 설치된 절삭유탱크에는 스

크류 장치 및 칩컨베이어(Chip conveyor)장치 등이 장착되어 다소 큰칩들의 분리기능은 좋으나, 이에 설치된 여과망 의해 제거되지 않은 미세칩들로 인해 펌프장치 및 주축에 손상과 품질에 영향을 끼치는 폐단이 발생하고 있다.^[1-2]

대부분의 연삭장치에서는 마그네틱 분리장치(Magnetic separator)로 철가루는 분리가 가능하지만 효율이 낮아 칩이 탱크에 침전되고 절삭유를 빠르게 부패시키며 정제가 덜된 절삭유로 인하여 가공에서 품질에 무시할 수 없는 영향을 끼치고 있는 실정이며 절삭유탱크가 구비된 공작기계에서

Corresponding Author : dhwang@kyungnam.ac.kr

Tel: +82-55-249-2712, Fax: +82-505-999-2160

제거되지 않는 미세한 칩은 가공표면에 영향을 주며 효율적으로 제거하는 장치의 필요성이 대두되고 있다.^[3-5]

본 연구에서는 절삭유의 흐름이 우수한 절삭유 탱크의 설계와 네오디뮴자석을 적용한 미세칩 이송장치를 절삭유탱크 하부에 설치하여 절삭유와 자석이 접촉하지 않고도 미세칩을 제거하는 동시에 미세칩 제거효율을 증대시키고자 하였다.

2. 개발품의 설계와 시제품의 제작

기존 절삭가공장비에서 많이 사용되는 절삭유 탱크를 Fig. 1(a)에 자석을 이용한 칩제거 장치를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 기존의 장치들은 많은 공간을 차지하고 있으며, 또한 미세칩 제거 효율이 낮아 자성재료인 네오디뮴 자석을 이용한 단순하면서도 효율적으로 미세칩을 제거하는 장치를 설계하였다.

Fig. 2 (a)에 네오디뮴 자석을 이용한 미세칩 제거장치의 절삭유의 처리 절차를 나타내었다. ①에서 가장먼저 미세칩이 혼합된 절삭유는 유입과 동시에 칩전이 일어난 후 ②의 탱크로 이동한다. 여기에서 ③의 네오디뮴 자석 컨베이어(Conveyor)를 이용하여 미세칩을 이송시키고 이송된 미세칩은 Fig. 2의 (b)와 같이 회전안내면을 따라 회수박스에 모이게 된다. 미세칩이 제거된 절삭유는 ③에서 메쉬필터를 통하여 ④탱크로 이동함과 동시에 미세칩이 제거된 절삭유는 펌프를 통하여 가공장비에 공급하게 된다. 그리고 절삭유는 ①~④의 순환을 반복하는 구조이다.

2.1 개발품의 부품 설계사양 선정

제품설계를 위하여 비자성의 재질인 투명 아크릴을 사용하여 절삭유탱크를 설계하였으며 Fig. 3은 2D설계도면이다. 미세칩 제거장치의 개발을 위하여 시중에서 구하기 수월하며 여러 가지 형태로 성형되어 선택의 폭이 넓고 다른 자석에 비하여 자력이 강한 네오디뮴자석을 적용하였다. 네오디뮴자석은 $\phi 15 \times 10$ 의 사양으로 115개를 자석간의 간섭 방지를 위해 교차 배열하여 사용하도록 하였다.

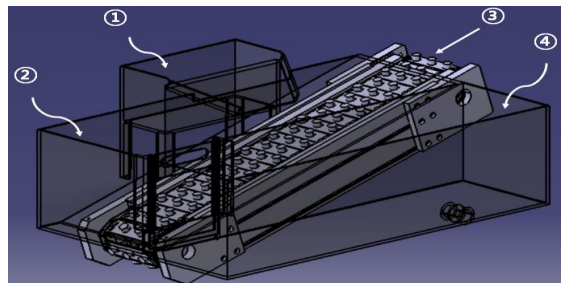


(a)Coolant tank



(b)Magnetic chip removal device

Fig. 1 Coolant tank and magnetic chip removal device



(a)Schematic diagram of coolant circulation



(b)Removing microchips using neodymium magnet

Fig. 2 Schematic diagram of coolant circulation for removing microchips using neodymium magnet

장치의 구동은 SPG사의 40W 60Hz 1550rpm 사양의 모터와 1:180의 감속기를 선정하였으며 주요 부품의 사양은 Table 1에 나타내었다.

Fig 4는 컨베이어의 2D설계도면이고 선정된 각각의 부품형상은 Fig 5의 (a)네오디뮴 자석, (b)모터, (c)모터 감속기, (d)펌프의 순으로 나타내었다.

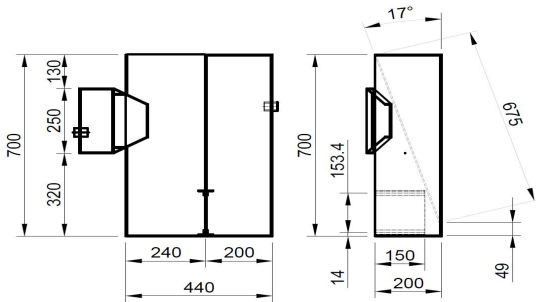


Fig. 3 2D design drawing for coolant tank

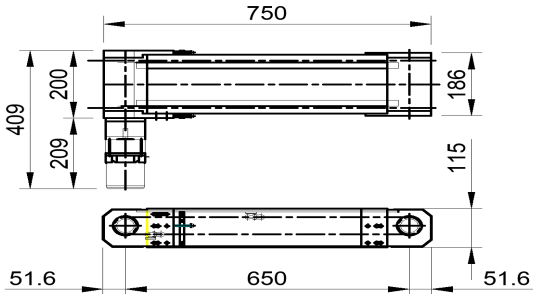


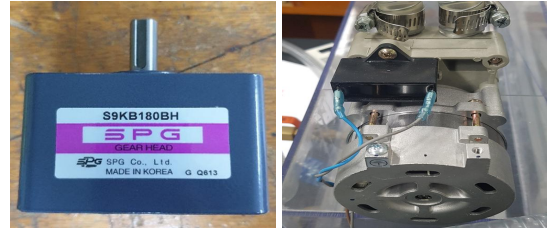
Fig. 4 2D design drawing for conveyor belt system

Table 1 Main part specifications for micro chip removal equipment

Part Name	Specifications of coolant tank	
Neodymium magnet	Magnet shape (mm)	Φ15x 10
	Flux density of work face (Gauss)	4810
Motor	Capacity (W)	40
	Revolution per minute (rpm)	1550
Motor reducer	Gear reduction ratio	1:180
Pump	Capacity (L/h)	1100 (0.3m)
	Pump output (W)	70



(a) Neodymium magnet (b) motor



(c) Motor reducer (d) Pump

Fig. 5 Major parts for coolant equipment with removing micro chips

3. 해석검증 및 개선설계

3.1 절삭유탱크 해석설계

Autocad 2D을 사용해서 개념설계(Conceptual design)를 완성하고 이를 바탕으로 CATIA를 사용하여 3D설계를 실시하여 절삭유탱크의 설계형상에 대한 펌프의 토출량에 대해 유동의 변화를 확인하고 설계목표에 만족하는 유동을 확인하고 설계변경 요소를 검토하고자 유동해석을 해석프로그램인 COMSOL Multiphysics 프로그램으로 해석검증을 실시하였다.

절삭유탱크에 대한 유동해석을 위해 포집한 칩의 높이에 따른 유동의 변화를 확인할 수 있도록 설정하여 Table 2와 같이 설계시정한 각각의 부품 사양을 기준으로 경계조건으로 설정하여 유동해석을 실시하기 위하여 (1)의 나비에-스톡스 방정식 (Navier-Stokes Equation)과 식(2)의 연속방정식 (Continuity Equation)을 사용하였다.

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

Table 2 Analysis conditions of coolant tank for flow analysis

Division	Coolant tank specifications		
Amount of coolant (m/s)	0.03		
Horizontal size (mm)	200		
Vertical size (mm)	200		
Total length (mm)	600		
Angle (degrees)	17°		
Height of the collected microchips(mm)	1	2	3

그리고 식(3)의 난류유동의 k-ε 모델로 사용하였다. 경계조건(Boundary condition)으로 옆면과 밑면은 슬립이 없는 것(No slip)으로 그리고 윗면은 오픈 경계(Open boundary)조건을 사용하였다.

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{k} = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \mathbf{k} \right] + P_K - \rho \epsilon$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} P_K - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{K}$$

$$\epsilon = \epsilon_p \tag{3}$$

Fig. 6, Fig. 7 Fig. 8은 각각 칩이 1mm, 2mm, 3mm로 쌓여진 경우 유동해석 결과이다. COMSOL Multiphysics 유동해석 결과를 통하여 자석에 포집된 칩의 높이가 증가할수록 질삭유의 유동은 칩의 높이증가에 따른 유동의 간섭이 증가하였으며 칩의 높이의 증가에 따른 Fig. 6의 (a)와 Fig. 7의 (b) 및 Fig. 8의 (c)위치에서는 투입 유속 0.03m/s(100%)의 유동변화를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Change in flow velocity according to the height of the chip

Input flow rate (m/s)	Height of microchips (mm)	Check flow rate (m/s)	Percentage
0.03 (100%)	1	0.021	70%
	2	0.0183	61%
	3	0.0165	55%

포집된 칩의 높이가 1mm 이때 0.021m/s(70%), 2mm일 때 0.0183m/s(61%), 3mm일 때 0.0165m/s(55%)로 유속이 감소하는 것으로 나타났다.

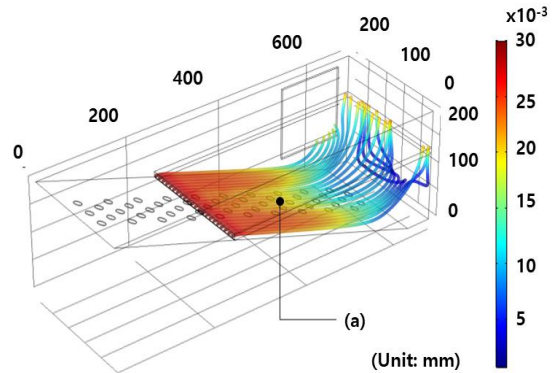


Fig. 6 Flow analysis result when the chip knob is 1mm

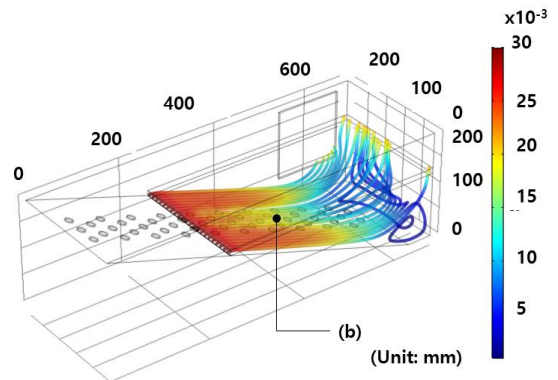


Fig. 7 Flow analysis result when the chip knob is 2mm

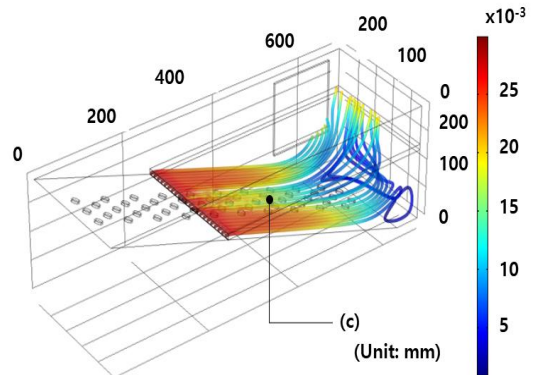


Fig. 8 Flow analysis result when the chip knob is 3mm

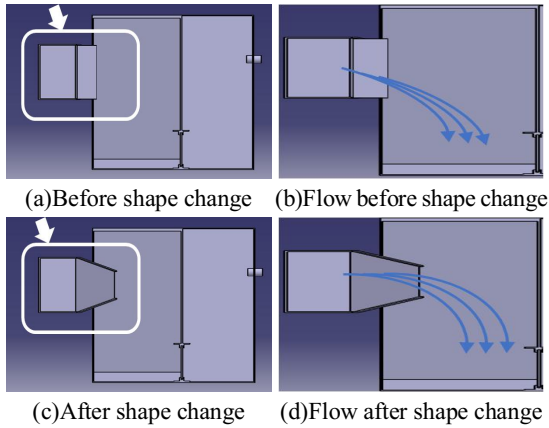


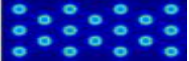
Fig. 9 Improved coolant tank structure

COMSOL Multiphysics을 사용한 유동해석 결과를 바탕으로 자석에 포집된 칩의 높이가 1mm인 경우보다 2~3mm로 증가할수록 절삭유류의 유동은 자력이 가장 많이 작용하는 중앙부가 유속이 느려지고 절삭유탱크의 우측 모서리에 와류가 발생하는 것을 확인하였다. 유동해석 결과를 설계에 반영하여 절삭유 유입구부분에 침전조를 설치하고 유입구의 형상을 변경하였으며 Fig. 9에 나타내었다. 형상변경전의 Fig. 9(a)에서는 Fig. 9(b)와 같은 유동이 나타났으며 Fig. 9(c)와 같이 침전탱크의 절삭유 주입구형상을 개선하여 Fig. 9(d)와 같이 중앙부에 유량을 증가하는 구조로 변경하였다. 형상변경을 통하여 중앙부에 유량을 증가시키는 유동을 만들 수 있었으며 자력이 가장 많이 작용하는 중앙부에 절삭유를 집중시키는 것이 미세칩 제거에 효율적임을 확인할 수 있었다.

3.2 칩 이송장치의 자속밀도 해석설계

네오디뮴 자석을 적용한 컨베이어 설계를 위하여 3D설계를 실시하고 자석의 배치, 자석의 수량, 절삭유탱크와 사이의 거리를 고정 값으로 지정하고 네오디뮴자석에 포집된 칩의 높이를 변수로 하여 COMSOL Multiphysics 프로그램으로 영구 자석을 부착한 컨베이어 자속밀도 해석을 위한 경계조건의 상세 값은 Table 4에 나타내었다. 미세칩 이송장치의 모델링은 좌우의 형상이 정대칭인 형상으로 자석밀도 해석과정은 다음과 같다.

Table 4 Conditions of the conveyor for magnetic field analysis

Division	Specifications of fine chip conveyor		
Array of magnets (Cross-array)			
Number of magnets (EA)	115		
Distance to coolant tank (mm)	1		
Height of the collected microchips (mm)	1	2	3

제시한 미세칩 제거장치 시스템은 자석의 자기력을 통해 자성을 띠는 입자를 제거하는 시스템으로 맥스웰 방정식의 가우스 자기법칙(식 4)과 앙페르 법칙(식 5)을 따른다.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{B} 는 자속밀도, \mathbf{H} 는 자기장세기, \mathbf{J} 는 전류밀도이다.

미세칩 제거장치에 사용된 자석은 네오디뮴 자석을 사용하였고 자석에 작용하는 외부자기장의 영향이 거의 없으므로 자석의 자기장 세기와 자속밀도의 관계식은 다음 식(6)과 같이 선형적으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (6)$$

여기서 \mathbf{B}_r , μ_0 , μ_r 은 각각 잔류자속밀도, 진공에서의 투자율, 그리고 상대 투자율이다.

Fig. 10은 유한요소해석 프로그램 COMSOL Multiphysics에서 칩의 높이가 1mm일 때 자석밀도를 해석한 결과이고 Fig. 11과 Fig. 12는 각각 칩의 높이가 2mm일 때와 3mm일 때의 자석밀도를 해석한 결과다. 해석결과를 확인해보면 포집된 칩의 높이가 증가할수록 자석밀도 또한 조밀하고 작용범위의 확대가 일어나는 것을 확인할 수 있다.

컨베이어의 자속밀도 해석을 통하여 자석에 포집된 칩의 높이가 증가할수록 자속밀도가 증가하고 자석이 위치한 부위의 자기력선이 조밀 하였다.

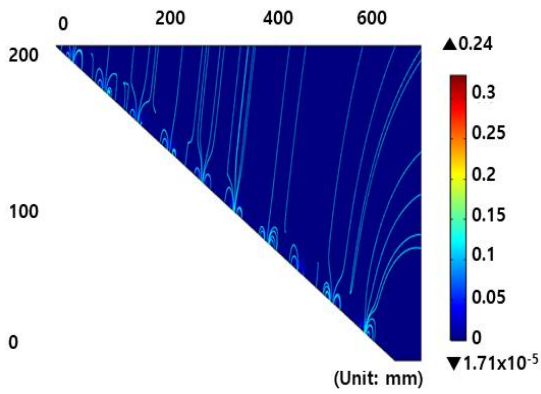


Fig. 10 Electromagnetic force analysis in neodymium magnetic conveyor (Chip height 1mm)

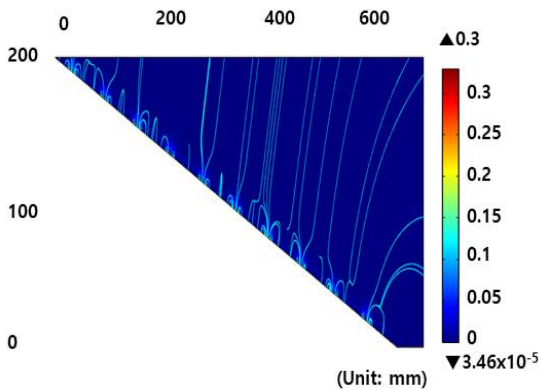


Fig. 11 Electromagnetic force analysis in neodymium magnetic conveyor (Chip height 2mm)

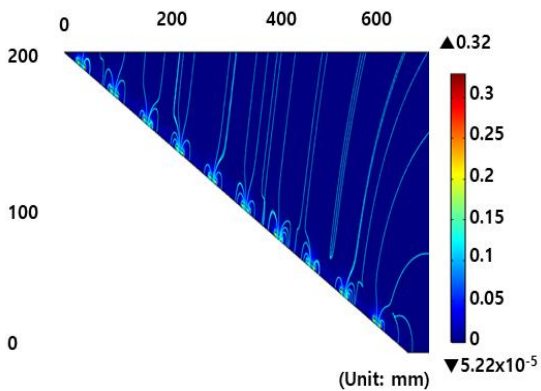
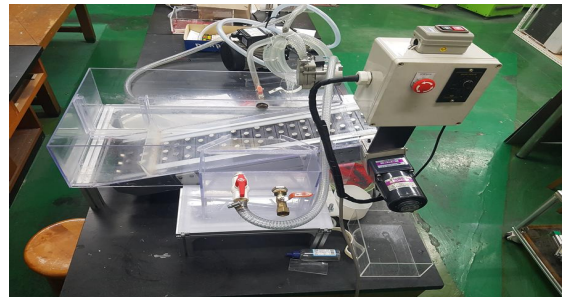


Fig. 12 Electromagnetic force analysis in neodymium magnetic conveyor (Chip height 3mm)

이를 바탕으로 칩전탱크의 절삭유투입부분의 형상 개선으로 컨베이어가 위치하는 중앙부에 유량을 증가시키는 구조변경이 미세칩 제거에 효율적임을 확인할 수 있었으며, 자석의 배치, 자석의 수량, 절삭유탱크와 자석사이의 거리배치 또한 시제품 적용에 적합함을 알 수 있었다.

3.3 시제품의 시운전

해석결과를 설계에 반영한 시제품을 Fig. 13(a) 과같이 제작하고 Fig. 13(b)와 같이 시험운전을 통해 해석결과와 비교하였으며 실험 결과는 Fig. 14 에 나타내었다. 시제품의 시험결과 그래프와 유동 해석과 자속밀도 해석결과를 비교하여 확인해본결과 실제실험에서도 자석에 포집된 칩의 높이가 증가할수록 절삭유의 유동은 유동의 간섭이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 컨베이어의 속도가 느릴수록 자석에 포집된 칩의 높이가 증가할수록 자속밀도가 증가하여 미세칩 제거에 효율적임을 확인하였다.



(a) Prototype production



(b) Microchip removal test commissioning

Fig. 13 Prototype of micro chip removal equipment using neodymium permanent magnet

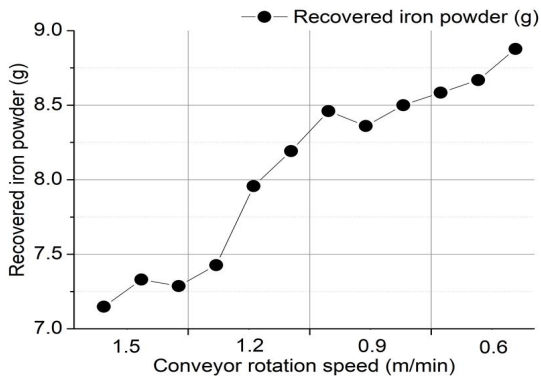


Fig. 14 Test run results of prototype

4. 결론

미세칩 제거를 위한 통합장치의 개발을 목표로 2D 개념설계와 3D설계를 거쳐 자속밀도 해석과 절삭유탱크에 대한 유동해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. COMSOL Multiphysics 유동해석 결과를 바탕으로 절삭유탱크에 대한 설계를 진행한 결과 자석에 포집된 칩의 높이가 증가할수록 절삭유의 유동은 칩의 높이증가에 따른 유동의 간섭이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
2. 절삭유탱크 해석결과를 통하여 절삭유의 유입 구부분에 칩에 대한 침전조가 필요하며 절삭유가 침전조를 넘어서 칩제거 단계로 흐를 때는 유입구의 형상에 따라 유동이 영향을 받고 칩의 포집에도 영향을 미친다는 것을 확인하였다.
3. 절삭유탱크에 투입 유속이 0.03m/s(100%)일 때 자석에 포집된 칩의 높이가 1mm로 증가하면 0.021m/s(70%), 2mm일때 0.0183m/s(61%), 3mm 일 때 0.0165m/s(55%)로 유속이 감소하는 것으로 나타났다.
4. 자속밀도 해석을 실시하여 자석에 포집된 칩의 높이가 증가할수록 자속밀도가 증가하고 절삭유탱크에서 컨베이어가위치하는 중앙부에 유량을 증가시키는 구조변경과 유량에 따른 모터속도제어가 필요한 것을 알 수 있었으며 속도제어장치의 적용이 미세칩 제거에 효율적임을 확인할 수 있었다.

5. 시제품시험결과 네오디뮴 자석 컨베이어의 속도가 1.5m/min의 경우 10g의 투입량대비 회수율이 70%의 경우보다 속도가 0.6m/min의 느린 경우 회수율이 90%에 가깝게 나타났고 기존의 제품보다 미세칩 제거에 유리함을 확인하였다.

REFERENCES

1. Kim, J. S., Lee, D. S., Wang, D. H., "Development of Coolant/Waste-oil Separating and Cooling System with Chip Treatment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16 No. 3, pp. 16-23, 2017.
2. Choi, S. Y., Kwon, D. G., "A Study of the Effectives for Surface Roughness by Cutting Angle and Cutting Fluid", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17 No. 1, pp. 57-62, 2018.
3. Sin, C. H., Jang J. G., "Effect of chemical treatment and variations of the physical properties of waste water-soluble cutting oil", Journal of Environmental Science International, Vol. 13, No. 4, pp. 403-412, 2004.
4. Lee, H. C., Kim, G. D., "A Study on the Discrimination of the Overhead Stirrer Impeller using the Dimensions of Permanent Magnets", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18 No. 2, pp. 52-57, 2019.
5. Lee, I. S., Kim, H. J., Kim, D. H., Kim, N. K., "A Study on Simulation of Chip Recycling System for the Management of Cutting Chip in 5-Axis FMS Line", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12 No. 6, pp. 175-181, 2013.